PAPELES DE GEOGRAFIA (FISICA) N.º 12, 1987. PAGS. 47-62

MORFOMETRIA DE REDES FLUVIALES: REVISION CRITICA DE LOS PARAMETROS MAS UTILIZADOS Y APLICACION AL ALTO GUADALQUIVIR

M.ª Asunción Romero Díaz*
Francisco López Bermúdez*

RESUMEN

Se pretende realizar una revisión crítica de la bondad de cada parámetro comúnmente utilizado en los estudios de morfometría de cuencas fluviales. Al mismo tiempo se verifica cuáles de ellos son los más significativos al aplicarlos al sistema fluvial de la cabecera del no Guadiana Menor, en el Alto Guadalquivir. Tras el estudio inicial de **42** variables agrupadas en relieve, topología, longitud, geometría e intensidad fluvial, y sometidas a un análisis factorial, se seleccionan finalmente nueve de ellas; constatándose como una cuenca en la que se estudien estas variables estará bien caracterizada en función de los elementos anteriormente citados. La pérdida de información es mínima y se reduce considerablemente el tiempo invertido en el análisis morfométrico.

Palabras clave: sistema fluvial, drenaje, morfometría, cuenca hidrográfica, redes.

MORPHOMETRY OF FLUVIAL NETWORKS: CRITICAL REVIEW OF THE MOST COMMONLY USED PARAMETERS AND THEIR APPLICATION TO THE UPPER GUADALQUIVIR

SUMMARY

A critical review of the strength of each parameter commonly used in morphometric studies of drainage basins is presented. At the same time the most significant parameters, when studying the morphometry of the headwaters of the Rio Guadiana Menor in the Upper Guadalquivir, are presented. Following an initial study of **42** variables grouped under relief, length, geometry and fluvial intensity, and subjected to factor analysis, **9** variables were finally selected; confirming that these variables characterize well the drainage basin for which they were studied. Using nine variables the loss of information is minimal and the time needed to undertake the morphometric analysis is reduced considerably.

Key words: fluvial systems, drainage, morphometry, hydrographical basin, network.

Introducción

La integración de todo el conjunto de procesos y características medioambientales de las cuencas hidrográficas, se expresa en la morfometría de las redes de drenaje asociadas a cursos de agua. Estos constituyen un sistema en el que el drenaje reacciona a la información enviada por cada uno de los parámetros y variables que definen la cuenca (García-Ruiz y cols., 1987). La forma y dinámica de las redes fluviales son el resultado de las características ambientales del conjunto del territorio (Morisawa, 1985) y constituyen sistemas de trasferencia de energía y materia en el territorio de sus respectivas cuencas. Su estudio implica necesariamente la consideración del carácter jerárquico que las mallas poseen a consecuencia de la organización inherente al sistema fluvial (López-Bermúdez; Peña-Monne, 1987).

En el presente trabajo se pretende realizar una revisión crítica de la bondad de cada parámetro en los estudios de morfometría de cuencas fluviales, previamente agrupados, verificar cuáles de ellos son los más significativos y aplicarlos al sistema fluvial de la cabecera del río Guadiana Menor en el Alto Guadalquivir (provincia de Granada) (fig. 1).

* Departamento de Geografía Física. Universidad de Murcia. 30001. Murcia, España.

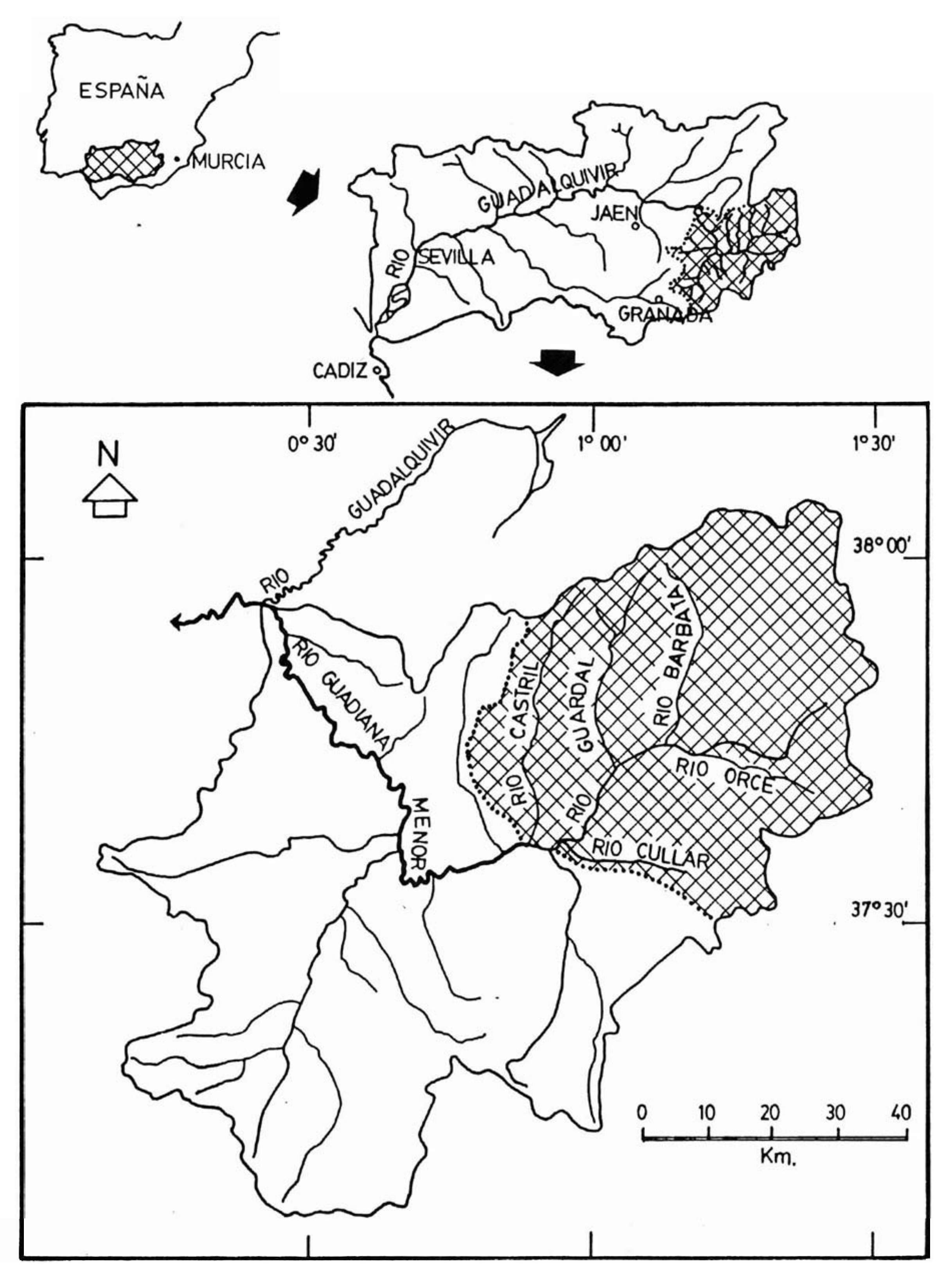


Fig. 1. Localización del área de estudio.

Antecedentes

Los estudios cuantitativos de morfometría fluvial

La definición y clasificación de las redes de drenaje y los cauces que las integran, han sido abordadas por los geomorfólogos desde dos puntos de vista; por un lado, el ***descriptivo,*** el cual clasifica los cursos fluviales según su forma y textura asociándolos a las características geológicas del sustrato. Por otro lado, el ***cuantitativo*** que analiza las redes de drenaje mediante una previa ordenación de cauces, estableciendo una jerarquización de órdenes de corrientes. Ambos métodos son aplicables según los objetivos propuestos en cada estudio, si bien el segundo presenta la ventaja de fijar un criterio objetivo que permite comparar las redes de drenaje entre sí y aportar mayor información en las relaciones formas-procesos hidrológicos y erosivos, que son la justificación de la mayor parte de los estudios sobre morfometría de redes fluviales.

Los fundamentos de los estudios cuantitativos de morfometría fluvial hay que buscarlos en las experiencias y reflexiones científicas de Guglielmini (1967), Bernaoulli (1654-1705), Chezy (1718-1798), Manning, Brahms, y en las ideas de Hatton (1737-1824) quien enunció la ley de las «uniones de los correspondientes tributarios., expresada a principios del siglo XIX por Playfair. Poco más tarde, Gravelius (1914) elabora una jerarquización de órdenes de corrientes. si bien fue Horton (1945) quien consiguió mostrar que las redes de drenaje podían ser estudiadas de modo cuantitativo según un modelo de órdenes de corrientes, modelo que Strahler (1964) modificó.

Las ordenaciones de Gravelius-Horton-Strahler, están basadas en relaciones estadísticas, pero existen otras enunciadas más recientemente que lo hacen de modo aleatorio, cuantificando los ***tramos*** en lugar de los ***cauces,*** es decir, los segmentos de cauce comprendidos entre dos nudos o confluencias. o bien entre una confluencia aguas arriba y la desembocadura del curso a la salida de la cuenca. La magnitud de un tramo, aspecto fundamental, se determina por el número de fuentes tributarias a dicho tramo, y la magnitud de una red de drenaje, es definida por el tramo de mayor valor. Los trabajos más conocidos en esta línea se deben a Shreve (1967, 1969, Smart (1968) y Mock (1971). Estos autores estudian la red de drenaje como un grafo arborescente formado por un conjunto de tramos interconectados. Los métodos de Shreve y de Scheidegger (1968), presentan las características de ser muy descriptivos en relación a la suma de corrientes, sin embargo, tras su laborioso cálculo se llega a comprobar que las redes de drenaje obedecen a las leyes enunciadas por Horton. En la actualidad las redes fluviales son interpretadas como la expresión de la información contenida en las cuencas (Dunne: Leopold, 1978).

Parámetros de morfometría fluvial comúnmente estudiados

Son múltiples y variadas las características morfométricas que pueden ser analizadas en los estudios de redes de drenaje de cuencas hidrográficas. Su número y tipología estará en función de la investigación a realizar y de los resultados que se pretendan obtener.

Algunos autores como Horton (1932), opinan que las características morfométricas que en una cuenca deben ser estudiadas son nueve: factor de forma, compacidad, altitud media, pendiente general de la cuenca, pendiente media, densidad de drenaje, número de corrientes, pendiente de las corrientes y dirección y longitud de la escorrentía superficial. Strahler (1964) distingue los aspectos lineales de los sistemas del cauce, los aspectos superficiales de la cuenca de drenaje y los aspectos de relieve, tanto de la cuenca como de los canales. Chorley (1967) utiliza la misma clasificación de Strahler pero divide los aspectos lineales en topológicos y geométricos. Gregory y Walling (1973) clasifican los atributos topográficos de la cuenca de drenaje en cuatro grupos: superficiales, de longitud, de forma y de relieve, diferenciando cada uno de ellos ya se trate de la cuenca, la red de drenaje, los canales y la sección transversal del cauce.

Aquí, tomando como base las dos últimas clasificaciones, se han agrupado las características morfométricas de la cuenca fluvial en los siguientes grupos: ***relieve, topología, longitud de los cauces, geometría de la cuenca,*** a los que se le ha añadido un grupo más, referido a la ***intensidad fluvial.***

Metodología

Se ha realizado una revisión de los principales estudios de redes de drenaje, a través de la cual se han recopilado las variables más utilizadas, que se elevan a 42.

Obtenidas las variables y su método de elaboración, se han agrupado según características afines en los grupos homogéneos atrás enunciados, es decir, en función del relieve, topología, longitud, geometría e intensidad fluvial. En cada grupo se distinguen ***parámetros*** e ***índices,*** entendiendo por ***parámetros*** los valores absolutos (área, longitud, número de cauces, etc.) y por ***índices,*** el resultado de la combinación de varios parámetros (razón de elongación, índice de sinuosidad, etc.). Para el conjunto de las variables de relieve se han estudiado cinco parámetros y cinco índices; para las topológicas siete parámetros y un índice; en las variables de longitud de los cauces nueve parámetros y dos índices; y por último, en las variables de intensidad fluvial cinco índices.

Definidas las variables y revisada su validez dentro del conjunto, parámetros e índices previamente aplicados a un espacio geográfico concreto, son sometidos a un análisis estadístico de tipo factorial, determinando así qué índices o parámetros son más significativos en el estudio

de las cuencas fluviales y cuáles de ellos pueden ser desestimados, evitando la elección arbitraria.

La aplicación y utilidad de análisis estadísticos de tipo factorial en investigaciones geográficas, aunque durante varios años ha sido objeto de debate (Armstrong, 1969; Mark y Chuch, 1971) hoy está ampliamente aceptada, especialmente para cuencas de drenaje; los trabajos de Mather y Doornkamp (1970), Abrahams (1972), Ebisemiju (1979, 1985), Castillo Sánchez (1986), entre otros, así lo ponen de manifiesto.

Al aplicar el análisis factorial a las variables se crean unos nuevos parámetros llamados ***factores*** o ***ejes***, sobre los cuales se van a disponer las variables de cada grupo. La contribución que cada variable aporta a un factor, viene indicada por la puntuación de los factores y por la representación gráfica de que se acompañan. El factor uno, se corresponde con el eje de abscisas, el factor dos, con el eje de ordenadas. Las variables que presentan las mayores proyecciones sobre un eje y estén más cerca de él, serán las más significativas de ese eje. Las variables situadas sobre un mismo eje, estarán relacionadas entre sí y proporcionarán una explicación semejante.

La toma de datos para la obtención de las variables y aplicación del análisis estadístico se ha realizado en las cuencas de los nos Castril y Guardal, en el Alto Guadalquivir. La amplia superficie global que ocupan estas cuencas parciales, 2.642 km^2, se reparte entre los 600 y los 2.400 m de altitud, configurando un variado relieve de sierras, altiplanicies y depresiones.

Las unidades de drenaje delimitadas para su estudio en esta superficie han sido 114 (Romero Díaz, 1987), adoptando para ello un criterio topológico, es decir, el número de orden, siendo objeto de estudio todas aquellas cuencas de un orden igual o superior a tres (según la clasificación de Strahler). La elección de este criterio se fundamenta en el hecho de no haber encontrado ningún otro parámetro más objetivo de subdivisión. Se ha tomado el orden tres por considerar que las cuencas de órdenes inferiores no poseen la entidad suficiente como para ser comparables con otras de órdenes superiores, y también por ser las cuencas de este orden, las más abundantes y por lo tanto las de mayor representación en el paisaje de cada una de las unidades de drenaje mayores.

Resultados

Definición de las variables morfométricas estudiadas

Variables de relieve

Las variables de relieve, entendidas como la tercera dimensión de una cuenca, son estudiadas en primer lugar por ser consideradas las de mayor importancia, de tal modo que, por ejemplo, la pendiente, tiene influencia directa en el tipo de drenaje, forma de los canales, velocidad y tipo de escorrentía, potencial erosivo o de carga de las corrientes, formas de modelado resultantes, características de la infiltración, depósitos en los lechos, etc., aspectos todos ellos de gran importancia en el sistema de la cuenca de drenaje.

Los parámetros de relieve estudiados han sido los siguientes:

Altitud máxima de la cuenca (HM), considerada como la cota más elevada dentro de ella;

Altitud mínima de la cuenca (Hm), que se corresponde con la cota más baja de la cuenca;

Desnivel absoluto (d), diferencia entre la cota máxima y la cota mínima;

Altitud media (Am), obtenida a partir de la media ponderada de las superficies planimetradas entre curvas de nivel consecutivas y dividiendo ésta por la superficie total;

Pendiente media de la cuenca (pm), calculada a partir del mapa de pendientes, elaborado mediante la superposición de una malla cuadrada de 2 cm de lado al mapa de la cuenca a E. 1:50.000 y hallando el valor de pendiente para el territorio del interior de cada cuadrícula. Tras interpolar y trazar las isopletas se ha planimetrado la superficie correspondiente a cada intervalo y mediante una media ponderada se obtiene la pendiente media de la cuenca. Si bien este método resulta muy laborioso se considera que es bastante preciso;

Pendiente media del cauce principal (Pca), en su formulación más simple, viene dada por la diferencia de cotas de altitud del cauce relacionada con la longitud del mismo;

Razón de relieve (Rr), que relaciona la diferencia de cotas de altitud según Schumm (1956). considerando el punto más alto de la cuenca, el más elevado de su perímetro y la longitud del cauce principal medida en dirección paralela al talweg;

Coeficiente de masividad (Cm) de Martonne (1940), resultado de dividir la altura media de la cuenca por la superficie;

Coeficiente orográfico (Co) de Martonne (1940), complementario del anterior, se obtiene multiplicando la altura media por el coeficiente de masividad;

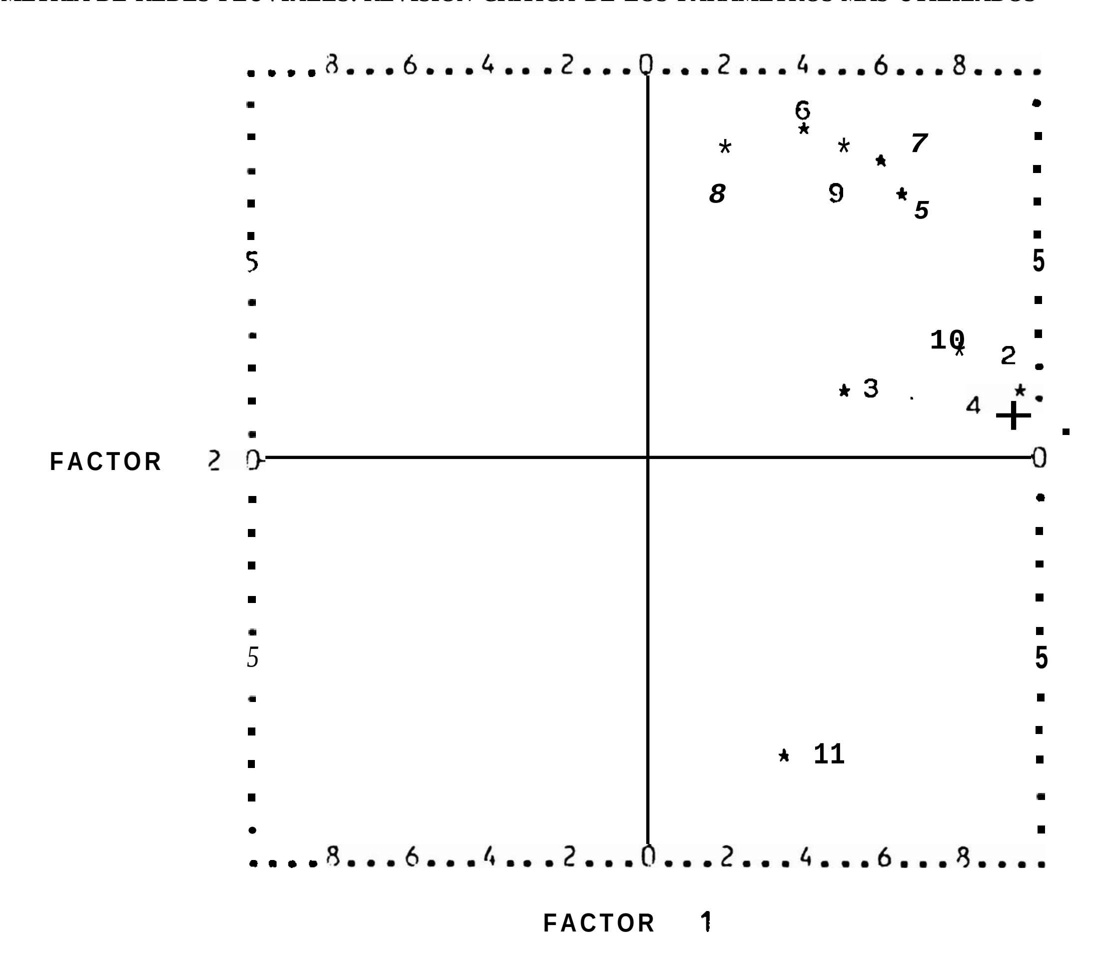
Número de rugosidad (NR) de Strahler (1958), que es el resultado de multiplicar el desnivel absoluto de una cuenca por la densidad de drenaje de la misma.

Por último, el ***factor topográfico*** (Ft) de Potter (1953) es el único índice de los que aquí se expresan, que relaciona el relieve del cauce principal por la raíz cuadrada de la pendiente media del mismo cauce.

Variables topológicas

Por la sencillez del método y universalidad de aplicación, en el análisis topológico se ha seguido el método de Strahler (1964) considerando cursos de primer orden aquellos que no poseen ningún tributario; de segundo los formados por la confluencia de dos segmentos de primer orden; de tercero los constituidos por la confluencia de dos de orden 2 y así sucesivamente.

Los parámetros topológicos (Strahler, 1964) analiza-



El solapamiento está indicado por el símbolo $

La escala es desde -1 a +1

		FACTOR 1	FACTOR 2
ALTIMAXI	2	0.943	0.174
ALTIMINI	3	0.505	0.140
DESNIVEL	4	0.920	0.076
PENDCUEN	5	0.657	0.677
PENDLAV	6	0.404	0.860
RR	7	0.583	0.778
CM	S	0.176	0.770
CO	9	0.523	0.758
NRUGO	10	0.822	0.235
FTOPO	11	0.337	-0.753

Fig. 2. Representación espacial de las variables de relieve para el estudio global del conjunto de cuencas.

TABLA 1
Parámetros estadísticos de las variables de relieve. Estudio global del conjunto de cuencas

PARAMETROS ESTADISTICOS PARA CADA VARIABLE			
VARIABLE	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION
2 ALTIMAXI	1327.02632	482.31757	0.363457
3 ALTIMINI	864.16667	224.05569	0.259274
4 DESNIVEL	457.34211	351.36346	0.768273
5 PENDCUEN	14.19386	9.80491	0.690786
6 PENDLAV	7.52193	6.50634	0.864983
7 RR	0.08992	0.07175	0.797870
8 CM	44.78035	64.95159	1.45045
9 CO	10729.01230	16955.88272	1.58038
10 NRUGO	990.42106	728.12123	0.735163
11 FTOPO	2.99746	3.47563	1.15953

COEFICIENTE DE CORRELACION MULTIPLE		COMUNALIDAD	
2 ALTIMAXI	0.93571	2 ALTIMANI	0.9205
3 ALTIMINI	0.67141	3 ALTIMINI	0.2742
4 DESNIVEL	0.85547	4 DESNIVEL	0.8522
5 PENDCUEN	0.86009	5 PENDCUEN	0.8902
6 PENDLAV	0.92032	6 PENDLAV	0.9031
7 RR	0.95305	7 RR	0.9440
8 CM	0.51826	8 CM	0.6241
9 CO	0.87710	9 CO	0.8475
10 NRUGO	0.74194	10 NRUGO	0.7315
11 FTOPO	0.48317	11 FTOPO	0.6810

FACTOR	VARIANZA EXPLICADA	PROPORCION ACUMULADA DE LA VARIANZA TOTAL
1	5.864815	0.586482
2	1.803400	0.766822
3	0.963616	0.863183
4	0.508971	0.914080
5	0.363964	0.950477
6	0.202881	0.970765
7	0.122619	0.983027
8	0.080057	0.991032
9	0.060140	0.997046
10	0.029536	1.000000

dos han sido siete, tratando por separado el ***orden de la cuenca,*** el ***número de cauces de cada orden*** (entre 1 y 5) y el ***número total de cauces.***

Como índice topológico se ha utilizado la ***razón de bifurcación*** (Rb), definida por Horton, como la relación del número de cauces del orden inmediatamente superior.

Variables de longitud de los cauces

De entre las variables de longitud de los cauces se distinguen nueve parámetros y dos índices. Cinco de los primeros están referidos a las ***longitudes de cada orden de corrientes*** (Strahler, 1964), dos a la ***longitud total de los cauces*** y ***longitud media,*** y otros dos a la ***longitud del cauce principal y longitud del cauce más largo*** (Horton, 1932). Los índices analizados son: ***razón de longitud*** e ***índice de sinuosidad*** del cauce principal.

La determinación del ***cauce principal*** se ha realizado seleccionando el curso de ángulo más pequeño, y a ángulos iguales, el de mayor longitud. Para la mayoría de las cuencas, el cauce más largo coincide con el principal

pero suele haber discrepancias fundamentalmente en cuencas de cabecera bífida.

La ***razón de longitud*** (Rl) expresada por Horton se interpreta como que la longitud media de los cursos se incrementa 2 y 3 veces al aumentar el número de orden. Mientras el ***índice de sinuosidad*** (IS) refleja la forma del canal, ya que muy frecuentemente la longitud del canal no se corresponde con la longitud del valle. Para determinar la relación existente entre ambas longitudes, Schumm (1963) propuso este índice, resultado de dividir la longitud del canal por la longitud del valle, creando así cinco categorías de sinuosidad: tortuoso, irregular, regular, transicional y recto.

Variables de forma y tamaño de las cuencas

La forma de la cuenca es un elemento muy importante que depende de su tamaño, perímetro, longitud y anchura. Estos son los parámetros que se estudian aquí para definir, a partir de ellos, varios índices que caractericen de algún modo la forma de la cuenca. Sin embargo, aún no se ha elaborado un índice con la validez suficiente de aplicación para poder clasificar a las distintas formas de cuencas.

El índice de forma más antiguo enunciado, quizás sea el ***índice de compacidad*** (Ic) de Gravelius (1914), expresado mediante la fórmula Ic=0'28 (P/A), siendo P el perímetro de la cuenca y A la superficie de la misma. Con posterioridad Horton define también un factor de forma (Fo), equivalente a la longitud de la cuenca al cuadrado dividida por la superficie. Miller (1953) crea la ***razón de circularidad*** (Rc) como la relación entre el área de la cuenca y el área del círculo de igual circunferencia. Schumm (1956) elabora la ***razón de elongación*** (Re), que es la razón entre el diámetro de un círculo con la misma área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma, medida ésta según el criterio del autor, que considera la longitud máxima como la distancia existente entre la desembocadura y el punto más alejado de su divisoria (Re=1'129 (A/L)).

Variables de intensidad fluvial

La intensidad fluvial suele ser definida mediante cinco índices: densidad de drenaje, índice de frecuencia, coeficiente de torrencialidad, constante de mantenimiento del cauce y longitud del flujo de escorrentía superficial.

La ***densidad de drenaje*** (Dd). Su cálculo consiste en dividir la longitud total de todas las corrientes por la superficie considerada, representando así una medida de longitud por unidad de superficie y en consecuencia constituye una medida de disección (Horton, 1932).

El ***índice de jrrcuencia*** (If) complementario del anterior se define como el número de cauces por unidad de superficie (Strahler, 1964).

La ***constante de mantenimiento del cauce*** (Cm) propuesta por Schumm (1956) es el inverso de la densidad de drenaje, dividiendo la superficie de la cuenca por la longitud total de los cursos.

El ***coeficiente de torrencialidad*** (Ct), multiplica la densidad de drenaje por el número de cursos de orden 1, en relación con la superficie, entendiendo que a mayor número de cursos de primer orden y menor superficie, la torrencialidad de la cuenca será mayor.

Por último la ***longitud de flujo de escorrentía superjicial*** (LD), queda definida como la proyección horizontal de la distancia entre la divisoria topográfica de la cuenca y el punto donde la escorrentía se concentra y forma un cauce de primer orden. Según Horton (1945), existe una distancia crítica a partir de la cual el volumen de escorrentía permite la excavación y el encauzamiento; esta distancia crítica es la considerada longitud del flujo de escorrentía superficial.

Análisis de las distintas variables

Variables de relieve

A través del análisis estadístico (fig. 2 y tabla 1), las variables de relieve que se han definido como más representativas dentro de su grupo son las siguientes: el ***desnivel,*** la ***pendiente media de la cuenca,*** el ***número de rugosidad*** y la ***razón de relieve.***

La ***altitud máxima*** y ***mínima*** si bien por sí solos no tienen una representación importante, si la poseen al ser los parámetros previos de cálculo para obtener el ***desnivel absoluto,*** que constituye una variable de gran importancia, utilizada además en el cálculo de la razón de relieve y el número de rugosidad. La ***altitud media*** resulta ser poco significativa al igual que el ***coeficiente de masividad*** y el ***coeficiente orográfico,*** cuyo cálculo aporta poca información.

La ***pendiente media del cauce principal*** es un parámetro de relieve básico para el cálculo del ***factor topográfico,*** índice que al relacionar distancia-velocidad, puede considerarse que representa el tiempo de escurrido del flujo de escorrentía.

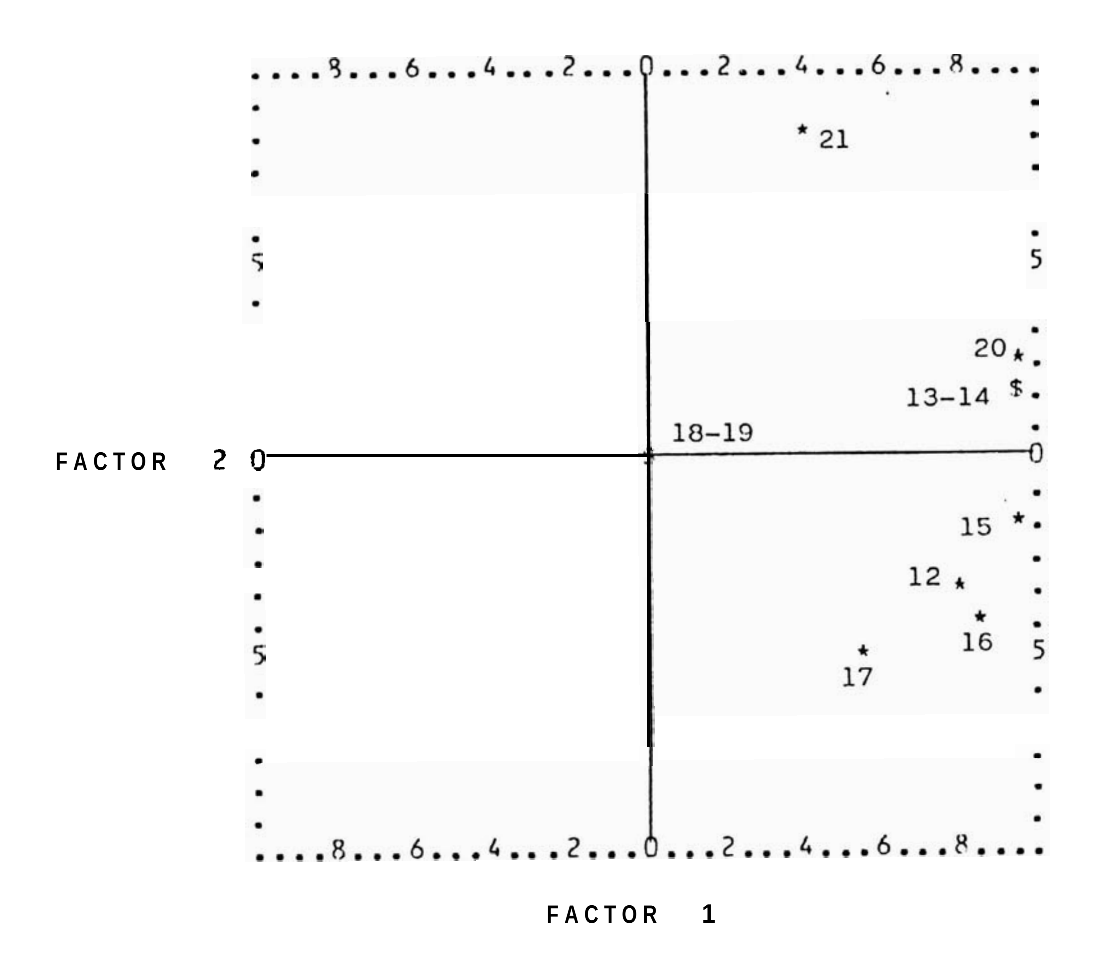
El ***factor topográfico*** viene a ser un índice complementario de la razón de relieve, pero en este caso a nivel de la cuenca de drenaje.

El ***número de rugosidad*** al considerar la densidad de drenaje, aporta información adicional en el estudio del relieve de una cuenca, por lo que también es importante su cálculo.

En definitiva, tras el análisis realizado, tanto por cuencas parciales como para el conjunto total de cuencas, se considera que en este grupo de variables puede suprimirse el cálculo de la ***altitud media, coeficiente de masividad*** y ***coeficiente orográfico.***

Variables topológicas

Las variables topológicas de mayor significación que se desprenden del análisis factorial (fig. 3 y tabla 2) son:



El solapamiento está indicado por el símbolo $
La escalo es desde -1 u +1

		FACTOR 1	FACTOR 2
O	12	0.802	-0.345
N1	13	0.951	0.235
N2	14	0.960	0.157
N3	15	0.941	-0.164
N4	16	0.848	-0.389
N5	17	0.573	-0.475
N6	18	0.010	-0.020
N7	19	-0.000	-0.000
NTOTAL	20	0.962	0.201
RB	21	0.415	0.808

Fig. 3. Representación espacial de las variables topológicas para el estudio global del conjunto de cuencas.

TABLA 2
Parámetros estadísticos de las variables topológicas. Estudio global del conjunto de cuencas

VARIABLE	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION
PARAMETROS ESTADISTICOS PARA CADA VARIABLE			
12 O	3.42982	0.53164	0.155005
13 N1	31.40351	38.75855	1.23421
14 N2	7.54386	9.07992	1.20362
15 N3	1.85088	1.56981	0.848142
16 N4	0.43860	0.61017	1.39118
17 N5	0.01754	0.13187	7.51635
18 N6	0.00877	0.09366	10.6771
19 N7	0.00000	0.00000	0.212676D+38
20 NTOTAL	41.20175	49.31983	1.19703
21 RB	3.62254	1.07479	0.296694

COEFICIENTE DE CORRELACION MULTIPLE		COMUNALIDAD	
12 O	0.95143	12 O	0.7616
13 N1	0.99934	13 N1	0.9605
14 N2	0.99409	14 N2	0.9465
15 N3	0.90441	15 N3	0.9129
16 N4	0.95859	16 N4	0.8704
17 N5	0.66814	17 N5	0.5532
18 N6	0.35774	18 N6	0.0005
19 N7	1.00000	19 N7	0.0000
20 NTOTAL	0.99962	20 NTOTAL	0.9657
21 RB	0.48412	21 RB	0.8253

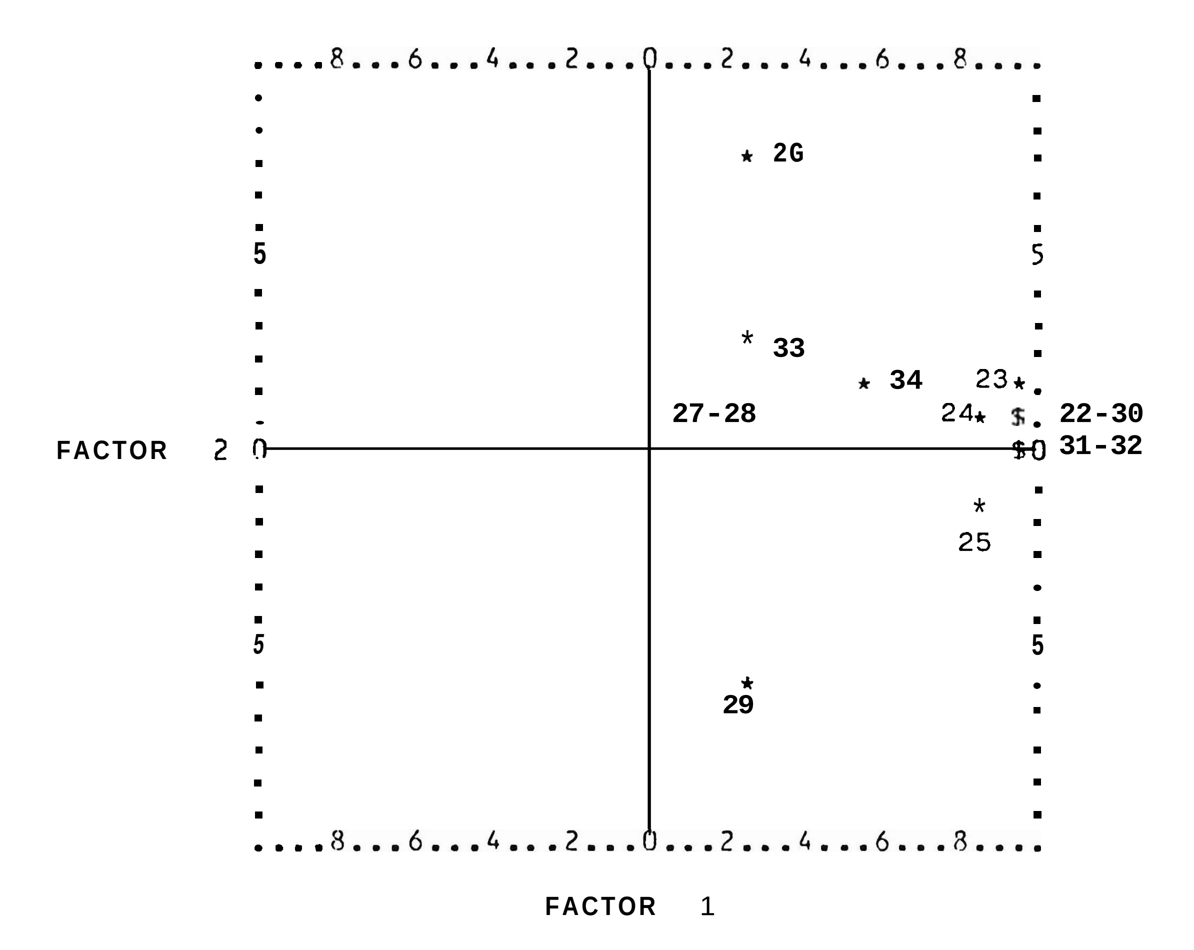
FACTOR	VARIANZA EXPLICADA	PROPORCION ACUMULADA DE LA VARIANZA TOTAL
1	5.504121	0.611569
2	1.292509	0.755181
3	1.018428	0.868340
4	0.647383	0.940271
5	0.411158	0.985955
6	0.083980	0.995287
7	0.028956	0.998504
8	0.013228	0.999974
9	0.000237	1.000000
10	–0.000000	1.000000

número total de cauces y *razón de bifurcación.* Aunque los cauces de los dos órdenes inferiores, **1.º** y **2.º** orden, poseen mayor representación, no se puede prescindir del cómputo de los cauces de órdenes superiores, por ser necesario para obtener el número total de ellos.

La importancia en morfometría fluvial de la *razón de bifurcación* radica en la información que aporta respecto al tamaño, forma y estructura de la cuenca.

Valores de bifurcación próximos a **2** nos indican cuencas con escaso relieve, valores entre **3** y **5** definen a cuencas de montaña, pero en las cuales las estructuras geológicas no influyen demasiado en la forma del drenaje, estando por lo general formados sobre rocas homogéneas. Los valores superiores a **5** y sobre todo aquellos que exceden de **10,** indican cuencas donde los caracteres estructurales condicionan fuertemente la instalación de cuencas estrechas y alargadas.

Por otra parte, respecto a la razón de bifurcación, hay que mencionar, en primer lugar que, valores de bifurcación bajos suelen corresponderse con formas redondea-



El solapamiento está indicado por el símbolo $

La escala es desde −1 a +1

		FACTOR 1	FACTOR 2
L1	22	0.947	0.138
L2	23	0.953	0.052
L3	24	0.849	0.101
L4	25	0.843	-0.162
L5	26	0.228	0.732
L6	27	0.000	0.000
L7	28	0.000	0.000
LMEDIA	29	0.251	-0.573
LTOTAL	30	0.963	0.105
LONCAPRI	31	0.962	-0.028
LONCALAR	32	0.962	-0.039
RL	33	0.269	0.284
IS	34	0.531	0.161

Fig. 4. Representación espacial de las variables de longitud para el estudio global del conjunto de cuencas.

TABLA 3

Parámetros estadísticos de las variables de longitud. Estudio global del conjunto de cuencas

PARAMETROS ESTADISTICOS PARA CADA VARIABLE			
VARIABLE	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION
22 L1	17.03772	21.88945	1.28476
23 L2	6.89474	9.74441	1.41331
24L3	3.78158	4.59660	1.21553
25 L4	1.65702	3.39276	2.04751
26 L5	0.10175	0.90953	8.93853
27 L6	0.00000	0.00000	0.212267D+38
28 L7	0.00000	0.00000	0.212676D+38
29 LMEDIA	0.69974	0.56764	0.811219
30 LTOTAL	28.21491	36.16870	1.28190
31 LONCAPRI	5.91842	4.98952	0.843049
32 LONCALAR	6.08860	5.10025	0.837672
33 RL	2.42930	1.59944	0.658398
34 IS	1.10763	0.12076	0.109025

COEFICIENTE DE CORRELACION MULTIPLE		COMUNALIDAD	
22 L1	0.94116	22 L1	0.9150
23 L2	0.95725	23 L2	0.9103
24 L3	0.85573	24 L3	0.7315
25 L4	0.84440	25 L4	0.7371
26 L5	0.46383	26 L5	0.6633
27 L6	1.00000	27 L6	0.0000
28 L7	1.00000	28 L7	0.0000
29 LMEDIA	0.11414	29 LMEDIA	0.3917
30 LTOTAL	0.95995	30 LTOTAL	0.9387
31 LONCAPRI	0.99295	31 LONCAPRI	0.9270
32 LONCALAR	0.99278	32 LONCALAR	0.9261
33 RL	0.22439	33 RL	0.1534
34 IS	0.34776	34 IS	0.3076

FACTOR	VARIANZA EXPLICADA	PROPORCION ACUMULADA DE LA VARIANZA TOTAL
1	6.507881	0.591626
2	1.093663	0.691050
3	1.003427	0.782270
4	0.925978	0.866450
5	0.694506	0.967547
6	0.417566	0.967547
7	0.183826	0.984259
8	0.091260	0.992555
9	0.051876	0.997271
10	0.026502	0.999680
11	0.003515	1.000000
12	0.000000	1.000000
13	–0.000000	1.000000

das, comportando riesgo de inundación por concentración rápida de escorrentías, como así lo han señalado Strahler (1964), Gregory y Walling (1973), Sala (1980), Morisawa (1985), Romero Díaz (1987), entre otros. Y en segundo lugar, que la disminución de la relación de bifurcación lleva consigo un aumento del orden de la cuenca; los modelos ideales de Glok (1931) respecto al desarrollo de los sistemas de drenaje; los experimentos en laboratorio acerca del conocimiento y desarrollo de las mallas de drenaje (Parker, 1977) o las mediciones realizadas sobre fotografía aérea en años diferentes, comparando las razones de bifurcación de los tramos bajos y medio-alto de una cuenca (Romero Díaz, 1985), así lo atestiguan.

Variables de longitud de los cauces

Los parámetros que expresan la longitud de cada orden de corrientes presentan el problema de su medición, no tanto por la tarea laboriosa que esto supone y las repetidas mediciones que deben realizarse para cometer los menores errores posibles, como por la determinación de hasta dónde prolongar los cauces de primer orden. Los criterios a adoptar son varios según la fuente de información: mapas a diferentes escalas, fotografías aéreas o trabajos de campo. Sobre el terreno se define un pequeño cauce cuando existe una incisión que permita concentrar las escorrentías; sobre la fotografía aérea éste ha sido también el criterio utilizado, prolongando el segmento hasta el punto de inicio visible de esta hendidura.

Las variables de estudio más significativas en este grupo han sido como en el caso anterior, los parámetros de las longitudes de los ***cauces de órdenes inferiores,*** la ***longitud total,*** y también en este caso la ***longitud media*** (fig. 4 y tabla 3).

La ***razón de longitud,*** aunque en el análisis parcial de cuencas ha aparecido como variable de definición del factor 2, en el análisis global presenta escaso valor, lo cual desaconseja su elección. La razón de longitud se considera complementaria de la razón de bifurcación, por lo que es menos usada en los estudios de redes de drenaje, además si su cálculo se efectúa según la ordenación de Strahler, como en este caso, su aplicación no es tan válida como si se realizase partiendo de la ordenación de su autor.

El ***índice de sinuosidad*** no posee la importancia de las variables seleccionadas, pero no por ello debe ser despreciado pues aporta una información complementaria de la forma de los canales. El cálculo de este índice según la fórmula de Schumm resulta sencillo, pero el resultado puede ser dificultoso de interpretar, porque en el mismo índice se incluyen la sinuosidad hidráulica y la sinuosidad topográfica. Leopold y Wolman (1957), Mueller (1968), Miall (1977), Morisawa (1985) entre otros autores, definen y clasifican diferentes tipos de sinuosidad.

Las variables que pueden ser suprimidas respecto a la longitud de los cauces son, el parámetro de ***longitud del cauce más largo,*** ya que suele coincidir en la mayoría de los casos con la longitud del cauce principal, y no es utilizado para el cálculo de ninguna otra variable; y la ***razón de longitud,*** por las razones anteriormente expuestas.

Variables de forma y tamaño de las cuencas

A través del análisis factorial se pone de manifiesto la relación inversa de algunas variables, especialmente los índices que indican formas contrapuestas elongadas o compactas. Dicho análisis para este grupo aconseja la selección del ***área*** como parámetro y de la razón de circularidad como índice.

El área es el parámetro más destacado en el estudio de una cuenca, por ello suele utilizarse de manera directa e indirecta en la elaboración de diversos índices. Su delimitación se suele hacer a través de las líneas divisorias de aguas superficiales, lo cual conduce a considerar a menudo una superficie inexacta. El área planimetrada mediante métodos cartográficos, es una proyección horizontal de la superficie real y si se desea calcular esta Última es necesario dividir la superficie de la proyección horizontal por el coseno de la pendiente media del terreno.

El ***perímetro,*** junto con la superficie configura la forma de la cuenca, e interviene en la elaboración de distintos índices.

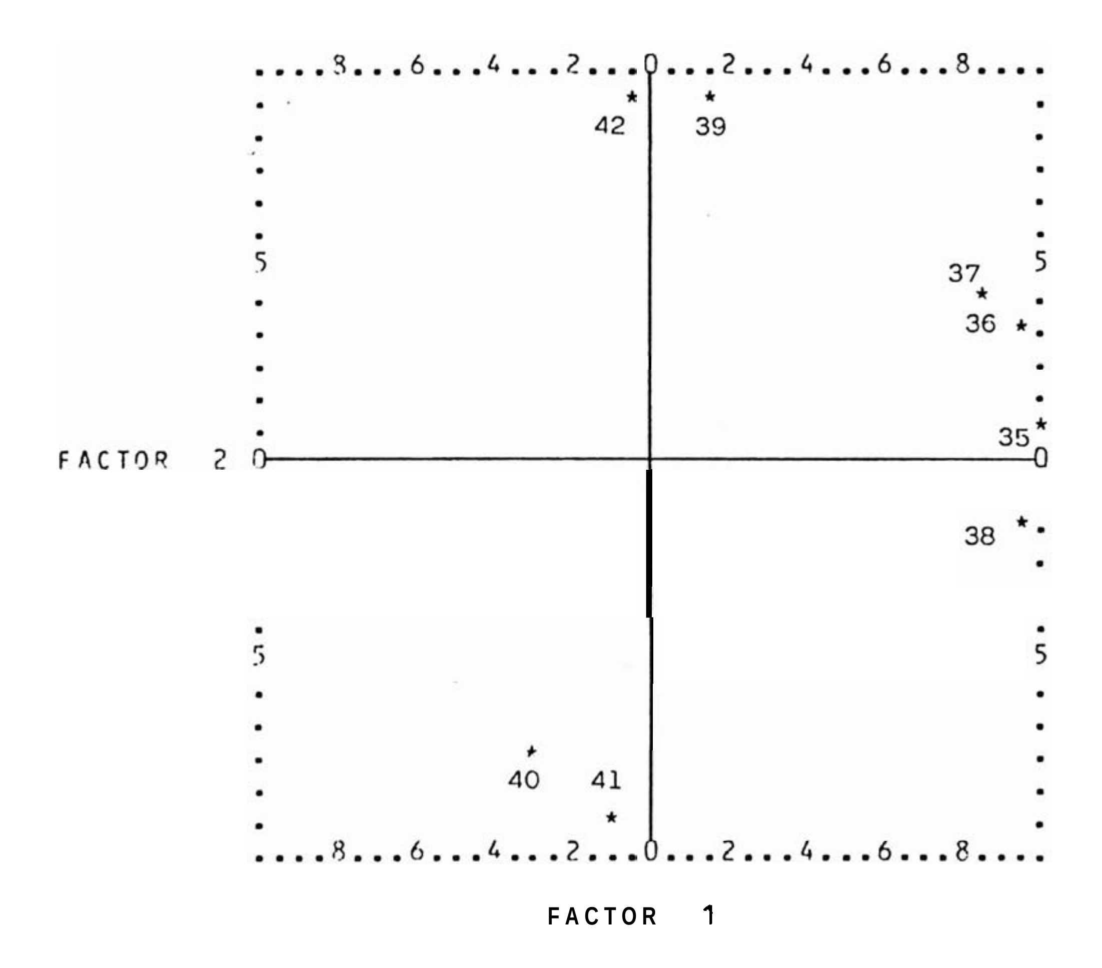
La importancia de la ***longitud de la cuenca*** como variable está en que determina no sólo la forma de la cuenca, sino también como se ha visto con anterioridad, el relieve. Sin embargo, se plantea el problema de su medición. Mientras unos autores consideran la longitud siguiendo a Horton, como la distancia entre la desembocadura de la cuenca y la intersección de la prolongación aguas arriba del cauce principal con la divisoria de aguas, otros siguiendo a Schumm, consideran que la longitud está mejor definida como la distancia existente entre su desembocadura y el punto más alejado de su divisoria. Este último método de medición ha sido el utilizado en esta investigación.

La ***anchura*** de la cuenca, variable que algunos autores calculan, al contrario de las anteriores variables, se muestra en el análisis realizado sin apenas significación. Además se considera que no tiene una formulación muy adecuada de cálculo.

La ***razón de circularidad*** y el ***índice de compacidad,*** aportan casi la misma información, por lo que es una redundancia calcular ambos índices. En este estudio se muestra una predilección por el cálculo de la razón de circularidad.

La ***razón de elongación,*** que viene siendo el índice más aceptado de entre todos los de forma, aporta la información contraria que el índice de circularidad, por lo que también parece inútil el cálculo de ambos.

En definitiva, Area, Perímetro, Longitud y Razón de



El solapamiento está indicado por el símbolo $

La escala es desde –1 a +1

Quinto grupo de **variables**

		FACTOR 1	FACTOR 7
AREA	35	0.977	0.073
PERIMETR	36	0.940	0.312
LONCUEN	37	0.871	0.420
ANCHUCU	38	0.944	-0.187
IC	39	0.130	0.922
RE	40	-0.239	-0.750
RC	41	-0.119	-0.928
F	42	-0.075	0.912

		FACTOR 1
DD	43	0.980
IF	44	0.924
CT	45	0.917
CM	46	-0.901
LD	47	-0.898

Fig. 5. Representación espacial de las variables geométricas para el estudio global del conjunto de cuencas.

TABLA 4

Parámetros estadísticos de las variables geométricas. Estudio global del conjunto de cuencas

VARIABLE	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION
PARAMETROS ESTADISTICOS PARA CADA VARIABLE			
35 AREA	14.43860	19.74344	1.36741
36 PERIMETR	15.97193	11.47147	0.718227
37 LONCUEN	6.15614	4.32664	0.702817
38 ANCHUCU	1.72702	1.27580	0.738731
39 IC	1.36509	0.22433	0.164331
40 RE	0.71658	0.24455	0.341275
41 RC	0.55237	0.16386	0.296650
42 F	3.88526	1.71689	0.441898

COEFICIENTE DE CORRELACION MULTIPLE		COMUNALPDAD	
35 AREA	0.93799	35 AREA	0.9606
36 PERIMETR	0.99177	36 PERIMETR	0.9821
37 LONCUEN	0.98514	37 LONCUEN	0.9351
38 ANCHUCU	0.91115	38 ANCHUCU	0.9262
39 IC	0.87022	39 IC	0.8664
40 RE	0.53715	40 RE	0.6462
41 RC	0.85543	41 RC	0.8750
42 F	0.84823	42 F	0.8365

FACTOR	VARIANZA EXPLICADA	PROPORCION ACUMULADA DE LA VARIANZA TOTAL
1	4.452662	0.556583
2	2.575456	0.878515
3	0.434188	0.932788
4	0.306401	0.971088
5	0.090406	0.982389
6	0.085689	0.993100
7	0.049950	0.999344
8	0.005248	1.000000

circularidad, parecen las variables más aconsejables para calcular.

Variables de intensidad fluvial

Las variables de intensidad fluvial se reducen tan sólo a índices, ya que todas ellas resultan de la combinación de varios parámetros. Todos los índices estudiados tienen una explicación de la varianza y una correlación muy elevada (tabla 5), lo que da idea de la similitud de los índices considerados en cuanto contribuyen a explicar el fenómeno de intensidad fluvial.

Sin duda, la variable más importante de este grupo y posiblemente del conjunto analizado sea la ***densidad de drenaje*** *y* ha sido reconocida por la mayoría de los investigadores como una característica topográfica de significación fundamental, al mismo tiempo que ha sido ampliamente aceptada por su facilidad de comprensión, simplicidad y utilidad.

La densidad de drenaje se ha demostrado que está íntimamente ligada con la precipitación en cuantía e intensidad con que ésta se produce; pero además la densidad va a depender de la litología, de las características que el suelo posea (principalmente de su capacidad de infiltración) y de la cubierta vegetal existente. Numerosos trabajos realizados en diferentes climas han puesto de manifiesto la importancia de todos estos factores, relacionando los valores de densidades obtenidos con características climáticas, litológicas, edáficas y de cu-

TABLA 5
Parámetros estadísticos de las variables de intensidadfluvial. Estudio global del conjunto de cuencas.

PARAMETROS ESTADISTICOS PARA CADA VARIABLE			
VARIABLE	MEDIA	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION
43 DD	2.49553	1.13700	0.455617
44 IF	4.87544	3.70010	0.758926
45 CT	11.42018	13.94411	1.22101
46 CM	0.47167	0.19106	0.405076
47 LD	0.23974	0.10170	0.424205

COEFICIENTE DE CORRELACION MULTIPLE		COMUNALIDAD	
43 DD	0.93891	43 DD	0.9599
44 IF	0.87803	44 IF	0.8532
45 CT	0.89187	45 CT	0.8409
46 CM	0.81781	46 CM	0.8123
47 LD	0.84864	47 LD	0.8060

FACTOR	VARIANZA EXPLICADA	PROPORCION ACUMULADA DE LA VARIANZA TOTAL
1	4.272274	0.854455
2	0.490355	0.952526
3	0.114104	0.975347
4	0.077886	0.990924
5	0.045381	1.000000

bierta vegetal. Sin embargo, cada autor propone unos índices de densidades de drenaje (Strahler, 1957); Park, 1977; Clowes-Comfort, 1982; Morisawa, 1985; etc.).

Un problema relacionado con la obtención de valores de la red de drenaje es la dispersión de resultados, por los distintos métodos que se utilizan y las diferentes escalas de trabajo. Por ello varios autores han propuesto métodos empíricos para el cálculo de densidades de drenaje, estudios comparados entre mediciones directas y estimadas, demuestran que no hay mucha diferencia en los resultados obtenidos por ambos métodos.

Respecto al resto de los índices calculados, el ***índice de frecuencia.*** al igual que el ***índice de torrencialidad*** serán altos si la densidad también lo es. La ***constante de mantenimiento del cauce,*** es el inverso de la densidad de drenaje, y la ***longitud del flujo de escorrentía superficial.*** es un índice aplicable tan sólo a cuencas de primer orden. Además', tanto el coeficiente de torrencialidad, como la constante de mantenimiento del cauce y la longitud del flujo de escorrentía superficial, incluyen en su formulación de cálculo a la densidad de drenaje.

Conclusiones

Tras la revisión de parámetros e índices morfométricos y el análisis estadístico realizado, se ha llegado, por un lado, a la selección de aquellas variables más significativas y por tanto que merecen ser estudiadas, por otro, aquellas que pueden ser desestimadas para no hacer onerosos trabajos de este tipo.

Las variables seleccionadas, nueve, son las siguientes: Relieve (desnivel y razón de relieve); Topología (número total de cauces y razón de bifurcación); Longitud (longitud total de cauces y longitud media); Geometría (área de la cuenca y razón de circularidad); e Intensidad fluvial (densidad de drenaje).

Para su cálculo sólo es necesario la elaboración de una jerarquización de órdenes de corrientes, medición de sus longitudes, perímetro, longitud, altitud máxima y mínima de las cuencas, así como superficies ocupadas.

La pérdida de información al prescindir del estudio del resto de las variables es mínima. Una cuenca en la que se estudien los parámetros e índices anteriormente citados, estará bien caracterizada en función de su relieve, topología, longitud, geometría e intensidad fluvial.

No obstante, como se mencionaba al principio, esto sólo resulta válido para estudios globales de cuencas fluviales, ya que estudios particulares de un aspecto o problema específico hará necesario el análisis de parámetros e índices precisos no contemplados aquí.

Referencias

ABRAHAMS, A. D. (1972): «Factor analysis of drainage basin properties: evidence for stream abstraction accompanying the degradation of relief». *Water Resources Research,* 8, pp. 624-633.

ARMSTRONG, J. S. (1969): «Derivation of theory by means of Factor Analysis or tom Swift and his electric Factor Analysis machine». *American Statistician*, 21, pp. 17-23.

CASTILLO SÁNCHEZ, V. (1986): «Caracterización morfológica de los paisajes fluviales madrileños». *Papeles de Geografía Física.* n.º 11, pp. 53-62.

CHORLEY, R. J. (1962): «Geomorphology and general systems theory*. *USGS Profesional Paper,* 500 B, 10 pp.

CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (1967): *Model in Geography.* London, 816 pp.

CLOWES, A.; COMFORT, P. (1982): *Process and Landform.* Conceptual Frameworks in Geography. Oliver and Bovd. Edinburgh. 289 pp.

DUNNE., T.:. LEOPOLD. L. B. (1978): *Water in environmental planing*. Freeman. San Francisco. 818 pp.

GARCÍA RUIZ, J. M.; GÓMEZ, A.; ORTIGOSA, L. M. (1987): *Aspectos dinámicos de un cauce fluvial en el contexto de su cuenca: el ejemplo del río Oja.* Monografías del Instituto Pirenaico de Ecología de Jaca e Instituto de Estudios Riojanos. Logroño. 112 pp.

GLOCK, W. S. (1931): «The development of drainage systems: a synoptic view». *Geogr. Rev.*, 21, pp. 74-83.

GRAVELIUS, H. (1914): *Flubkunde.* Gosche'sche Verlagshan dlung Belin, In: Zavoianu, I., 1985. *Morphometry of drainage Basins*. Elsevier. Amsterdam.

GREGORY, K. J.; WALLING, D. E. (1973): *Drainage Basin Form and Process. A geomorphological approach.* Ed. Arnold. London, 456 pp.

HORTON, R. E. (1932): «Drainage basin characteristics». *Trans. Amer. Geophys. Union,* 13, pp. 350-361.

—(1945): «Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology». *Geol. Soc. Amer.* Bull, 56, pp. 275-370.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G. (1957): «River channel patterns braided, meandering, and straight». *U.S. Geol. Survey Prof.* Paper 282 B, 39-85 pp.

LÓPEZ BERMÚDEZ, F.; PENA MONNE, J. L. (1987): «Geomorfología y Dinámica Fluvial: tendencias actuales en los países anglosajones y en España». *X Congreso de Geografía.* Ponencia. Zaragoza (en prensa).

MARK, D. M.; CHURCH, . (1971): «On the misure of regression in earth science». Math. Geol., 9, pp. 63-75.

MARTONNE, E. (1940): *Traité de Geographie Physique.* Armand Colin, París.

MATHER, P. M.; DOORNKAMP, J. C. (1970): «Multivariate analisis in geography with particular reference to drainage-basin morphometry». *Transactions Institute of British Geographers.* 51, pp. 163-187.

MIALL, A. D. (1977): *Fluvial sedimentology*. Canadian Soc. of Petro-Geologist, calgary, 859 pp.

MILLER, V. C. (1953): A quantitative geomorphic study of drainage basin charactenstics in the Clinch mountain area: Va. and tenn. *Office Naval Research Project* NR, Tech.Rept, 3. Columbia University.

MOCK, S. J. (1971): «A classification of chanel links in stream networks». *Water Resources Research,* 7, pp. 1.558-1.566.

MORISAWA. M. E. (1985): *Rivers. Form and Processes.* Longman, London, 222 pp.

MUELLER, J. E. (1968): «An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes». *Ann. Ass. Amer. Geog.* 58, pp. 371-385.

PARK, Ch. C. (1977): «Dry valley network and density in Malta*. *Rev. de Geom. Dyn.,* 26-2, pp. 49-59.

PLAYFAIR, J. (1801): *Illustrations of the Huttonian theory of the earth.* Edinburgh.

POTTER, W. D. (1953): «Rainfall and topographic Factor that affect Run-off». *Transactions of the American Geophysical Union.* 34, pp. 67-73.

ROMERO DÍAZ, M. A. (1985): «Observaciones acerca de la evolución del abarrancamiento en la rambla de Albudeite. Cuenca de Mula (Murcia)». *IX Coloquio de Geografía,* A.G.E., 11 pp.

—(1987): *Estudio hidrogeomorfológico de las cuencas de los ríos Casrril y Guardal (Cabecera del Guadalquivir).* Universidad de Murcia. Tesis Doctoral (inédita). II tomos, 1.178 pp.

SCHEIDEGGER, A. E. (1968): «Horton's Law of Stream Numbersn. *Water Resources Research,* 3, pp. 655-658.

SCHUMM, S. A. (1956): «The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey*. *Geol. Soc. Amer. Bull.,* 67, pp. 597-646.

—(1963): «A tentative classification of alluvial river channels». *U.S. Geol. Survey Circular* 477, 10 pp.

SHREVE, R. L. (1966): «Statisctical law of stream numbers», *Jour. Geol.,* 74, pp. 17-37.

SMART, J. S. (1968): *«Statistical properties of stream length» Water Resources Research,* 4, pp. 1.001-1.014.

SHREVE, R. L. (1967): «Infinite topologically randon channel networks». *Journal of Geology,* 75, pp. 178-186.

STRAHLER, A. N. (1957): «Quantitative analysis of watershed geomorphology». *Trans. Amer. Geophys. Union,* 38, pp. 913-920.

—(1958): «Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms». *Geol. Soc. Amer. Bull.* 69, pp. 279-300.

—(1964): «Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks». In V. T. Chow (ed.), *Handbook of Applied Hydrology,* 4, pp. 39-76.